

Обґрунтування створення детонаційного CO_2 лазера для дезактивації радіоактивних поверхонь

О. В. Галак, О. І. Кравчук, С. Ю. Петрухін, О. П. Клімов, С. В. Касьян, О. М. Блєкот, А. А. Нікітін, В. І. Коцюрuba

Лазерний метод дезактивації базується на випаровуванні оксидних плівок під впливом випромінювання. За випарювального механізму лазерне випромінювання повинно за час імпульсу нагріти верхній шар плівки до температури кипіння та випарити його. Він актуальний тому, що у світі зростають вимоги до екологічної безпеки, це дає можливість створення компактної, енергоефективної лазерної установки. На відміну від існуючих лазерних енергоефективних установок, детонаційна лазерна система надасть можливість суттєво впливати та швидко здійснювати дезактивацію забруднених поверхонь радіоактивними ізотопами за рахунок випаровування оксидних плівок під дією випромінювання. Детонаційні технології відносяться до критичних технологій, на основі яких можуть бути реалізовані пульсуючі детонаційні системи, наприклад, пульсуючі детонаційні двигуни, детонаційні лазери, магнітогідродинамічні генератори з детонаційним згоранням палива, системи ініціювання об'ємного вибуху. Впровадження цих систем на озброєнні та військовій техніці може суттєво змінити сферу їх застосування. Середня потужність лазера може перевищувати 100 кВт і вище. При цьому, застосування суміші, як джерела енергії, робить систему не тільки компактною, але і малою по масі у відношенні до існуючих подібних систем. Довжина хвилі за рахунок формування випромінювання в далекій інфрачервоній області становитиме 10,6 мкм. Тобто, комбіновані силові установки забезпечать не тільки силовий привід і електричне енергозабезпечення машин. Це дозволить створити силові детонаційні установки з частотою періодичного ініціювання не менш, ніж 100 Гц, які будуть працювати на зрідженій суміші і незначним використанням кисню в запальною порції

Ключові слова: іскровий розряд, передіонізація, струмопровідний канал, лазери, детонація, дезактивація, лазерне випромінювання, напруга

1. Вступ

Радіаційний вплив джерел іонізуючого випромінювання, які широко застосовуються у світі, є одним із небезпечних техногенних факторів, що може мати негативний вплив на людину та навколишнє середовище внаслідок руйнування. Використання джерел іонізуючого випромінювання з порушенням норм, правил і стандартів із радіаційної безпеки створює ризик зовнішнього опромінення. Ці порушення можуть призвести до забруднення навколишнього природного середовища і надходження радіоактивних речовин до організму

людини, про що свідчить аварія на Чорнобильській АЕС (Україна) у 1986 році та АЕС Фукусіма (Японія) у 2011 році.

Предбачалося дообладнати українські АЕС установками для сортування і пресування твердих радіоактивних відходів, спалювання твердих радіоактивних відходів і рідких радіоактивних відходів, глибокого випарювання, установками регенерації радіоактивних масел тощо. Але ці проектні рішення не реалізовані в повному обсязі. Відсутність переробних комплексів призводить до передчасного заповнення ємкостей для збереження рідких і твердих радіоактивних відходів [1].

Створення лазера, що забезпечить зниження споживаної потужності системи ініціювання детонації за рахунок зменшення втрат енергії розряду, є актуальними.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

В роботі [2] вказувалось, що у США, ЮАР та Росії розроблені та впроваджені методи лазерного поділу ізотопів. Широко застосовуються лазерні лідари для контролю за забрудненням середовища радіоактивними ізотопами. Деякі компанії США та Росії використовують лазерні системи у процесі утилізації обладнання АЕС.

У Росії з початку 90-х років у ДНЦ РФ "ТРИНІТ" почалось розроблення мобільних технологічних комплексів на базі потужних газорозрядних CO₂-лазерів [3]. У кінці 90-х років були створені комплекси МЛТК-5 і МЛТК-50. Комплекс МЛТК-5 створений на основі безперервного CO₂-лазера замкненого контуру з накачуванням самостійним розрядом із вихідною потужністю 5 кВт, який базується на шасі автомобіля. Комплекс МЛТК-50 був створений на основі імпульсно-періодичного електроіонізаційного CO₂-лазера відкритого контуру з потужністю 50 кВт. Обладнання розміщувалось на двох автомобільних напівпричепках, вага дорівнювала 48 т.

У США фірмою AVLIS (Atomic Vapor Laser Isotope Separation) із 1970 до 1980 року розроблялись лазерні системи, які випарюють ізотопи [4]. Ця ідея відмерла внаслідок загальної кількості потужностей і скорочення арсеналу озброєння. За допомогою лазера можливо іонізувати атоми якого-небудь ізотопу. Суттєвий недолік полягає у переналаштуванні з одного ізотопу на інший.

Американським департаментом з енергії (DOE, US Department of Energy) було запропоновано для дезактивації ядерних установок використовувати високопотужні лазери [5]. У період із 1992 до 1996 року лабораторією Еймса в межах проекту Ames Laser Decontamination Project досягнуто результатів з розробки ексимерного KrF-лазера потужністю 100 Вт (248 нм) і Nd-лазера YAG Q-switch (1064 нм), для вивчення переміщення радіоактивного оксиду по металевих поверхнях. Для розробки був запропонований прототип лазера Nd:YAG, який працює в короткому діапазоні, довжина його хвилі становила (1064 нм), за допомогою звичайних оптичних волокон. Інші проекти призначались для дезактивації бетону [6]. Нещодавно для розбирання ядерних

установок був запропонований хімічний лазер з назвою COIL (Chemical Oxygen Iodine Laser) [7].

У Франції починаючи з 1999 року проведено досліди з лазером Nd: YAG та ексимерним лазером [8]. Комісаріатом з атомної енергії був розроблений і випробуваний прототип LEXDIN на випадок дезактивації камери з оргскла. Дезактивація за допомогою ультрафіолетового лазера: прототип LEXDIN, CEA, 1996, в якому прототипі використовується ХеСІ-лазер і дзеркала для передавання лазерного пучка.

В Бразилії зростає інтерес до лазерної радіоактивної дезактивації металевих поверхонь. Основними перевагами в порівнянні з традиційними методами: підвищена безпека, зменшення вторинних відходів, зменшення обсягу відходів, прийнятна вартість. Основним механізмом очищення CO₂-лазер лазерами є абляція [9].

В роботі [10] приводяться попередні результати дезактивації ²⁴¹Am-забруднене металевий лом, отриманий при обробці радіоактивних блискавководів лазерної абляції. Наносекундний лазер Nd: YAG використовувався з енергією 300 мДж, залишаючи лише невелику кількість вторинних відходів, що підлягають обробці.

Про практичний метод значного скорочення обсягів забруднених відходів, які повинні зберігатися шляхом використання когерентного випромінювання, що випускається лазером, для видалення фіксованого радіоактивного забруднення тільки з поверхні металевих відходів зазначено в роботі [11]. Одномодовий імпульсний волоконний лазер використовувався для видалення фіксованого забруднення з підкладки з нержавіючої сталі шляхом абляції.

Експериментальні результати дезактивації ексимерним лазером були отримані для різних радіонуклідів (Cs, Co, Eu і т. д.), осадження в різних умовах (фіксований або нефіксоване забруднення). Прототип лазерної дезактивації складається з ХеСІ-лазера, пучка волокон для передачі променя, оптичної системи, збірна осередок з фільтром для видалення віддалених частинок, комп'ютерний контроль ефективності очищення і переміщення пучка [12].

В роботі [13] описано прототип лазерного очищення на основі процесу ексимерлазерної абляції. Цей прототип був випробуваний на ядерних установках. В основному він складається з ХеСІ-лазера, пучка волокон для передачі променя, оптичних систем, осередки для збору з фільтром для видалення віддалених частинок, комп'ютерного контролю ефективності очищення і зміщення променя.

CO₂ лазери мають низку суттєвих недоліків, а саме: високі енергоефективні вимоги до установки, великі масогабаритні показники за рахунок систем охолодження та турбокомпресорів, низька вихідна потужність і високі витрати на виготовлення.

Детонаційне згоряння палива в детонаційних системах виключає потребу у використанні турбокомпресорів для накачування детонаційної труби з відповідним зменшенням енерговитрат.

Ідея застосування для отримання лазерного випромінювання була запропонована у вигляді детонаційного лазера, які показали високу ефективність, але конструкція була одноразовою [14].

На підставі зазначеного можна стверджувати, що доцільним є проведення дослідження з розроблення пропозицій із створення компактної лазерної установки. Вона виключає потребу у використанні турбокомпресорів для накачування детонаційної труби, систем охолодження лазерних агрегатів, що відповідно зменшує енерговитрати.

Головна і невирішена на сьогодні проблема в практичній реалізації пульсуючих детонаційних систем пов'язана зі створенням енергоефективної системи періодичного ініціювання детонації.

3. Мета і завдання дослідження

Метою дослідження є виявити джерела поглинання енергії високовольтного іскрового розряду в процесі прямого ініціювання детонації в газових сумішах і визначити механізми впливу на розрядний процес, щоб забезпечити зниження втрат енергії розряду.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- визначити вимоги до джерела прямого ініціювання детонації в пульсуючих детонаційних системах, під час виконання яких забезпечується зниження втрат енергії розряду;
- удосконалити експериментально-розрахункову техніку дослідження вольтамперної характеристики, миттєвих значень потужності, енергії, що виділяється на іскровому проміжку;
- запропонувати схему роботи лазера, лазерне накачування якого забезпечується процесом періодичного детонаційного згоряння палива.

4. Матеріали та методи дослідження ініціювання детонації

4.1. Математичні моделі розвитку іскрового розряду

Розглянуто математичні моделі розвитку іскрового розряду за С. І. Дробкіною та С. І. Брагинським. У моделях урахується відхилення стану газоплазми у струмопровідному каналі від ідеального, передбачено розширення радіусу введення енергії. За граничними умовами в моделях задавалась наявність ударної хвилі, параметри якої залежать від кількості енергії, що вводиться в область, що моделює іскровий канал. Розв'язання задачі здійснено у автомобільному наближенні. Моделювання в зазначеній постановці можливе лише щодо середовища, яке хімічно не реагує. Поглинання або виділення енергії в результаті перебігу хімічних реакцій. Розвиток каналу потужнострумового іскрового розряду задовільно описується математичними моделями, викладеними у роботі [15]. Автор розв'язав задачу розширення струмопровідного каналу, задавши однаковим тиск по перетину каналу і використовуючи дивергентні рівняння законів збереження маси, енергії з урахуванням теплоперенесення. Поточний тиск p_k в струмопровідному каналі залежав від швидкості його розширення.

У моделях С. І. Драбкіної та С. І. Брагинського враховується відхилення стану плазми в струмопровідному каналі від ідеального, передбачено розширення радіусу введення енергії. На граничних умовах у моделях задавалося наявність ударної хвилі, параметри якої залежать від кількості енергії, яка вводиться в область моделюючого іскрового каналу. Розв'язання задачі здійснено в автомоделному наближенні. Моделювання в зазначеній постановці можливо лише щодо середовища, яке хімічно не реагує. Поглинання або виділення енергії в результаті пербігу хімічних реакцій призводить до зміни термодинамічної стану середовища з відповідним впливом на параметри ударної хвилі, а швидкість виділення хімічної енергії залежить від інтенсивності ударної хвилі. Тому зазначені математичні моделі розвитку іскрового розряду не можуть бути застосовані для моделювання процесу ініціювання детонації. На сьогодні в математичних моделях іскрового розряду враховують кінетику плазмохімічних реакцій, перенесення тепла випромінюванням і т. і.

4. 2. Моделювання ініціювання детонації у воднево-кисневій суміші по експериментальній динаміці введення енергії

Було проведено моделювання ініціювання детонації в іскровий канал, враховуючи розширення області введення енергії і криву зміни введення енергії. Промодельовано перехідний процес у R L C ланцюга з нелінійним активним навантаженням [16]. Зміна напруги на проміжку задавалося з експериментальних даних табл. 1.

Таблиця 1

Зміна напруги на проміжку в залежності від часу

Напруга на проміжку U , В	15000	5900	3130	1885	1480	1250	960
Час t , с	0	$3 \cdot 10^{-8}$	10^{-7}	$3 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-7}$	$7 \cdot 10^{-7}$	10^{-6}

Використовуючи розрахункову криву струму, експериментальні дані із напруги поля в стовпі дуги і зміни радіуса каналу, що проводить струм, було пораховано питому потужність (рис. 1).

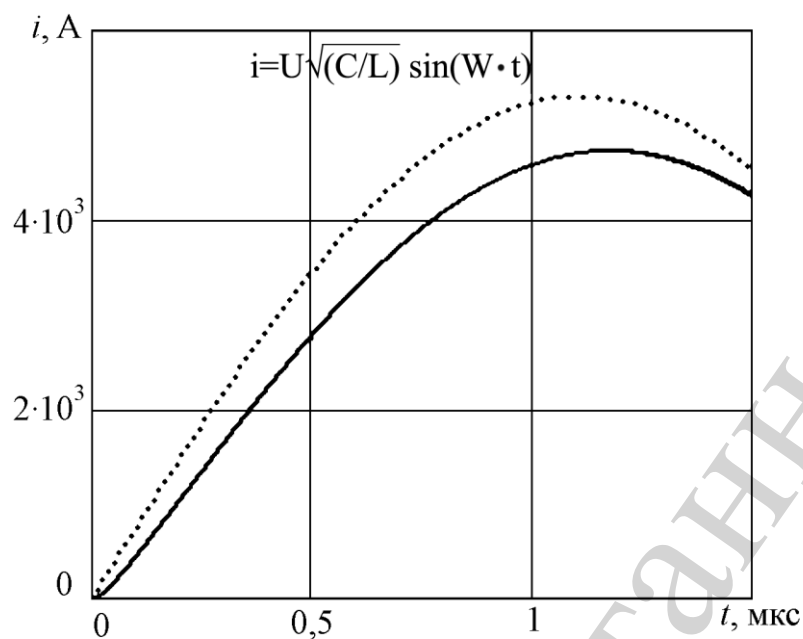
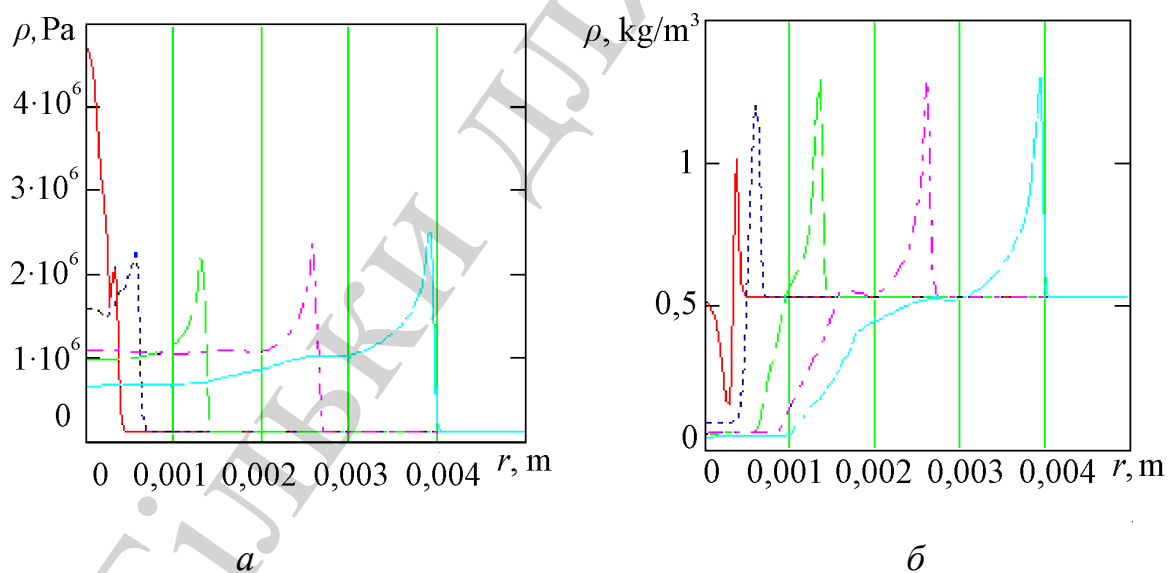
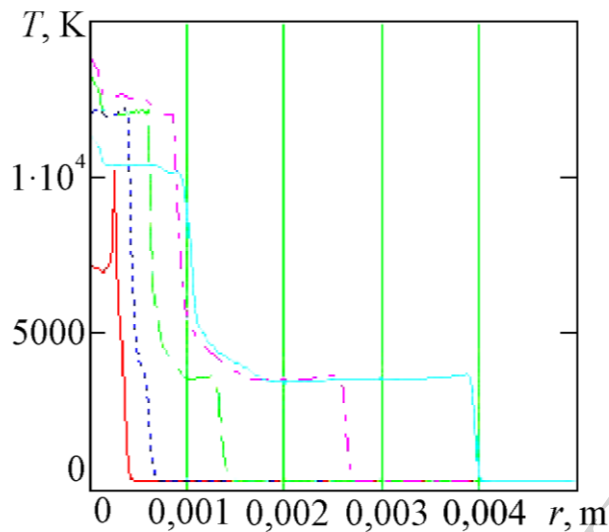


Рис. 1. Уточнена крива струму

Стосовно до зазначеного розрядного ланцюга маємо таку динаміку розвитку каналу. Підтримка інтенсивності ударної хвилі після припинення введення енергії забезпечується детонаційним згорянням (рис. 2).





6

Рис. 2. Розподіл по перетину каналу в різні моменти часу, $P_{\text{ср}}=4.9 \cdot 10^6$ Вт/см³, $C_1=0,25$ мкФ, $L_1=2$ мкГн, $U_1=15$ кВ: *а* – тиску, *б* – щільності, *в* – температури:
— 0,1 μs, 0,2 μs, --- 0,5 μs,
- · - · - 1 μs, — 1,5 μs

В наведених результатах моделювання ініціювання детонації конденсатором із номіналом $C=0,25$ мкФ, зарядженим до напруги $U_0=15$ кВ, і індуктивністю ланцюга $L=2$ мкГн, помітно, що спочатку радіус області високого тиску збігається з радіусом області введення енергії ($t=0,1$ мкс). В подальшому виникає розрив між фронтом ударної хвилі й областю введення енергії (“оболонкою” каналу), що відповідає експериментальним даним [17]. З розвитком іскрового каналу відбувається зростання відстані між областю введення енергії і фронтом хвилі. Саме між цими областями виникають умови для виділення хімічної енергії за рахунок згорання водню. Область виділення хімічної енергії відбивається в появі сходинок на графіку температури.

Поблизу осі каналу виникає температура, яка перевищує 10000 К. За цієї температури водень не згорає, а відбуваються дисоціації молекулярних водню і кисню. Як результат, сповільнюється зростання температури через поглинання частини енергії на процеси дисоціації та іонізації.

Шляхом інтегрування величин енергії, зосереджених у компонентах на фіксовані моменти часу, можливо оцінити використання введеної енергії на процес згорання. Отримано, що на період до $t=8 \cdot 10^{-7}$ с в розряді переважають ендотермічні реакції, що викликані поглинанням енергії розряду в результаті перебігу процесів дисоціації (рис. 3).

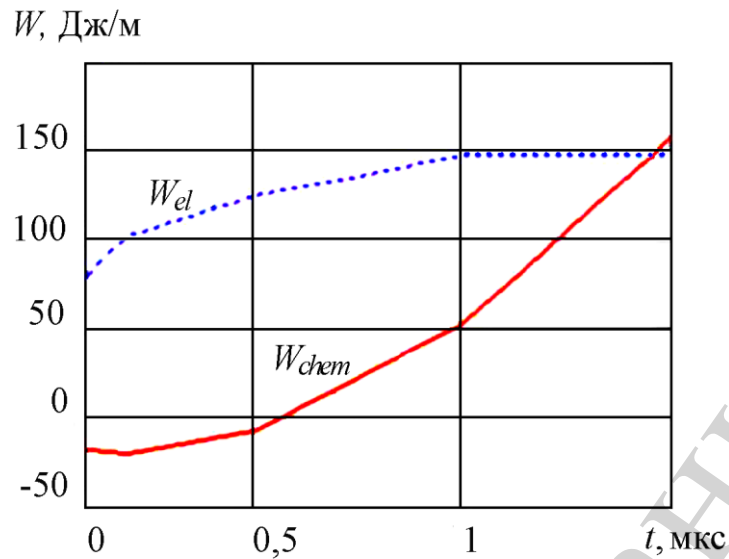
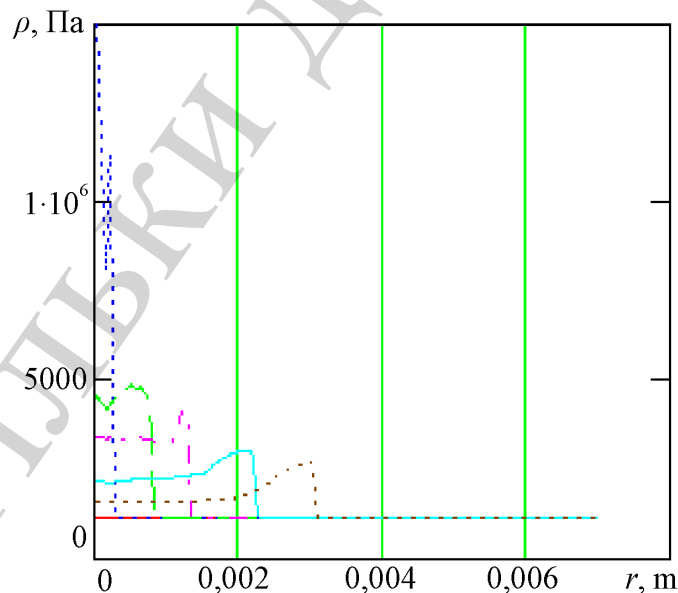
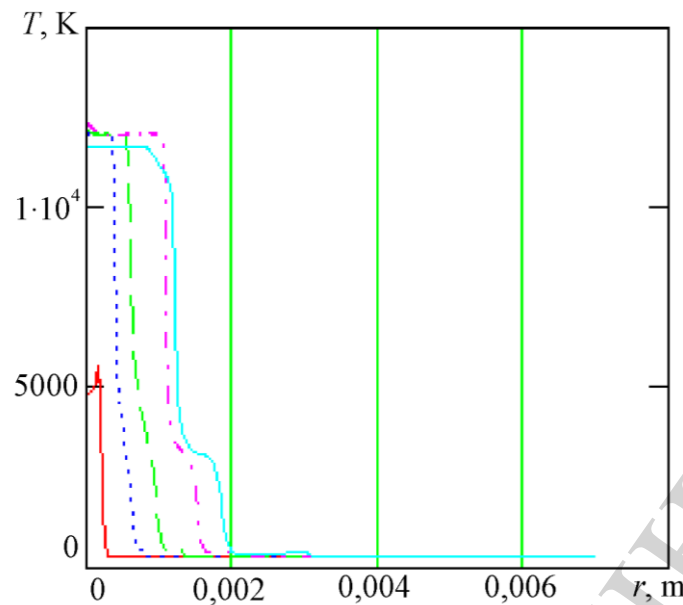


Рис. 3. Зміна кількості введеної електричної енергії W_{el} — і енергії W_{chem} , що виділяється (поглинається) під час хімічних реакцій —

Якщо збільшити індуктивність розрядного ланцюга або обмежити час введення енергії, то в результаті ініціювання детонації не відбувається $C_1=0,25$ мкФ, $L_1=12$ мкГн, $U_1=15$ кВ. У цьому випадку через малі розміри області, в якій відбувається виділення хімічної енергії, зростання тиску при згорянні встигає компенсуватися падінням тиску за рахунок розширення (рис. 4).





б

Рис. 4. Розподіл по перетину каналу в різні моменти часу: а – тиску: ; – 0,1 μ s, --- – 0,5 μ s, -.-.- – 1 μ s, — – 2 μ s, – 3 μ s; б – температури: — – 0,1 μ s; – 0,5 μ s, --- – 1 μ s, -.-.- – 2 μ s, — – 3 μ s

Дослідження розряду, як джерела прямого ініціювання детонації, проводилося за допомогою експериментальних і розрахункових методик. Для розрахунку кривих падіння напруги на розрядному проміжку кривих опору проміжку і кривих потужності використовувалися такі дані: початкові умови, параметри ланцюга, криві струму.

В результаті процесу розвитку іскрового каналу встановлено, що введення енергії в іскровий канал здійснюється не за фіксованим радіусом, відбувається падіння напруги на розрядному проміжку, а крива струму відхиляється від синусоїди внаслідок загасання. Тому розглядаючи завдання прямого ініціювання детонації, необхідно врахувати залежність введення енергії в газорозрядний проміжок від часу і її перерозподіл у просторі.

4. 3. Експериментально-розрахункова техніка дослідження введення енергії в іскровий канал по осцилограмах розрядного струму.

До складу електричного кола входить електричний конденсатор і розрядний проміжок. Еквівалентна електрична схема даного ланцюга складається з активного, індуктивного і ємнісного елементу. Ємність в даному колі утвориться власною ємністю конденсатора, паразитними ємностями проводів і ємністю розрядного проміжку до моменту його пробоя. Індуктивна складова викликана власною індуктивністю конденсатора, індуктивністю з'єднаних проводів і індуктивністю розрядного проміжку після його пробоя. Активний опір утворюється через внутрішній опір конденсатора, активний опір проводів і розрядного проміжку. Елементом із нелінійними характеристиками в такому

колі є розрядний проміжок, який впливає на іскровий розряд у дуговій стадії через нелінійність його активного опору. Як правило, даний ланцюг можна описати у вигляді зосереджених RLC-елементів, де активний опір має постійну і змінну складові рис 5.

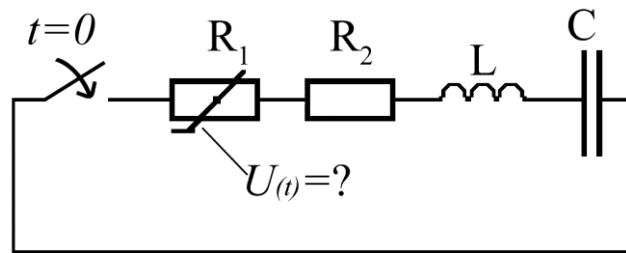


Рис. 5. Еквівалентна схема розряду конденсатора на розрядний проміжок в дугового стадії

Здійснювався розряд ланцюга в режимі короткого замикання при заданій напрузі заряду ємності. Визначалися активний опір і зосереджена індуктивність ланцюга, за яких розрахункова крива струму задовільно апроксимує виміряну криву струму короткого замикання. Після цього в розрядний ланцюг вводився іскровий проміжок і здійснювалося осцилографування кривих розрядного струму.

Значення миттєвої напруги на розрядному проміжку розраховувалися за інтегро-диференціальними рівняннями, що описує перехідний процес у розрядному ланцюзі на основі законів Кірхгофа. Кожна зі складових рівняння в чисельному вигляді має такий вигляд.

$$u_p = - \left(R_2 \cdot i + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i \cdot dt \right). \quad (1)$$

Значення струму через фіксовані інтервали часу Δt бралися з результатів вимірювання струму цифровим осцилографом, що видаються у вигляді чисел. Накопичення помилки під час розрахунку значень миттєвої напруги на розрядному проміжку може бути викликане підсумовуванням помилок під час розрахунку поточної напруги заряду ємності u_c .

$$u_p(t_a) = - \left[R_2 \cdot i(t_a) + L \frac{i(t_{a+1}) - i(t_{a-1}))}{2\Delta t} + \right. \\ \left. + u_c(t_{a-1}) - \frac{[i(t_{a-1}) + i(t_a)\Delta t]}{2C} \right]. \quad (2)$$

Криві опору проміжку і потужності визначалися за такими рівняннями. Розрахунок миттєвого опору проміжку:

$$r_1(t_a) = -\frac{u_p(t_a)}{i(t_a)}, \quad (3)$$

і розрахунок миттєвої потужності:

$$p(t_a) = u_p(t_a) \cdot i(t_a). \quad (4)$$

Для перевірки удосконаленої техніки було проведено порівняння отриманих результатів з результатами прямого вимірювання компенсованого високовольтного подільника (рис. 6).

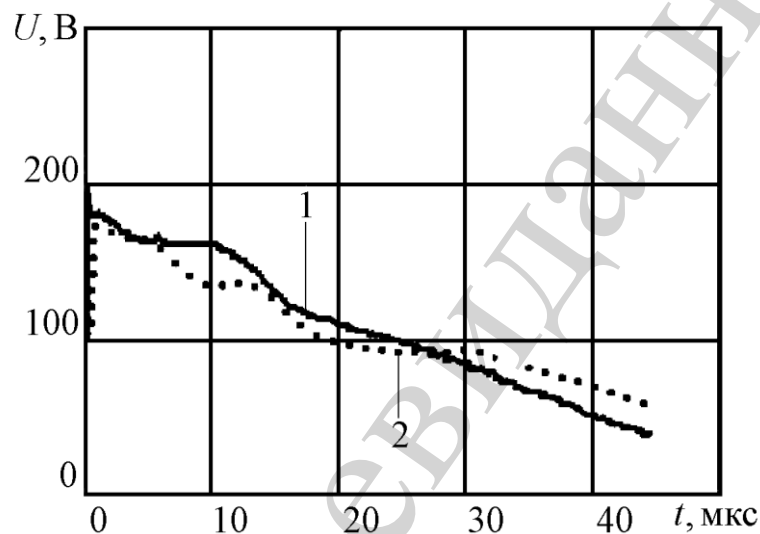


Рис. 6. Порівняння розрахункової та експериментальної кривих напруги на розрядному проміжку: 1 – вимір напруги компенсованим високовольтним дільником Р6015А фірми ТЕКТРОНІХ, 2 – напруга, що отримується за вдосконаленою технікою дослідження розряду

Результати порівняння кривих опору (крива 1), що розраховуються з результатів прямих вимірювань падіння напруги на проміжку і розрядного струму, з кривими опору (крива 2) показують цілком задовільний збіг експериментальної і розрахункової кривих, що відбивається у відхиленні результатів досліджень не більше, ніж на 20 % [18].

4. 4. Експериментальне дослідження прямого ініціювання детонації та впливу параметрів розрядного ланцюга на характеристики розряду

Реалізація управління іскровим розрядом у пульсуючих детонаційних системах технічно здійсненна в разі зниження напруги в розрядній ланцюга до 2000 В, тобто в діапазоні напруг, де працюють швидкодійні IGBT-транзистори. Для експериментальної перевірки можливості прямого ініціювання детонації від розряду ємності з низькою напругою заряду була зібрана установка згідно

зі схемою рис. 7. Заряд ємності C забезпечувався від джерела живлення ЗП через обмежувальне опір R . Для реалізації розряду за низької напруги джерела, розрядний проміжок замикався смужкою алюмінієвої фольги товщиною 16 ± 3 мкм і шириною $0,5 \pm 0,1$ мм. Довжина розрядного проміжку дорівнювала близько 10 мм. Момент ініціювання детонації задавався моментом умикання блоку керування.

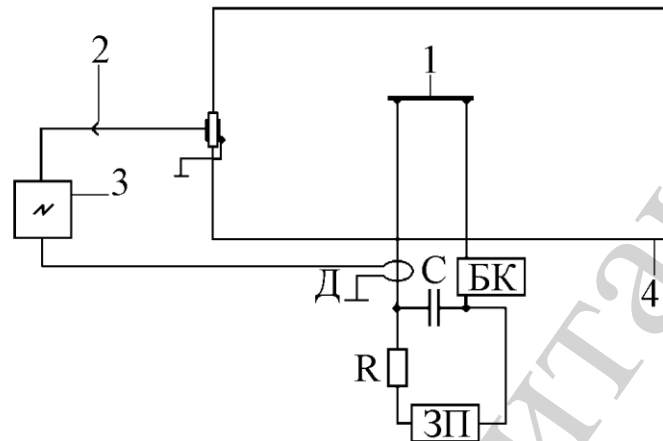


Рис. 7. Схема установки дослідження ініціювання детонації від низьковольтного імпульсного джерела: 1 – смужка фольги; 2 – п'єзодатчик тиску; 3 – осцилограф; 4 – оболонка; ЗП – зарядний пристрій (джерело живлення); БК – блок керування; R – опір; C – конденсатор D – процес ініціювання газової детонації

Воднево-киснева суміш, близька до стехіометричної складу, формувалася в оболонці. Вимірювання наявності детонації здійснювалося за допомогою п'єзодатчика тиску, з'єданого з осцилографом. Розгортання сигналу здійснювалося за сигналом, одержуваного від безіндуктивного датчика струму. Наявність ініціювання детонації визначалася як за кривою тиску, що реєструється п'єзодатчиком, так і за часом проходження ударної хвилею відстані від точки ініціювання до датчика. Результати покадрової обробки відеозйомки вибуху оболонки рис. 8.





а



б

Рис. 8. Результати покадрової обробки відеозйомки вибуху оболонки: інтервал часу між кадрами – 2 мс: *а* – формування миттєвого вибуху; *б* – повільний розліт продуктів детонації; *в* – охолодження епіцентру вибуху

В експерименті застосовувався осцилограф DS1000E фірми RIGOL (Китай), що має смугу пропускання 20 МГц. П'єзодатчик тиску виготовлявся на основі п'єзокераміки ЦТС-19. Товщина алюмінієвої фольги визначалася шляхом попереднього вимірювання маси обраної смужки фольги, з наступним розподілом маси на площу зваженої ділянки. Вимірювання маси здійснювалося на аналітичних вагах ВЛР-200 2 класу точності по ГОСТ 24104-88. Маса вимірювалася з точністю до 0,1 мг.

Для заповнення оболонки воднем використовувався генератор водню SRI H2-40. Заповнення оболонки киснем здійснювалося від генератора кисню ОпухAir 2EP, що генерує кисень з чистотою до 98 %. Співвідношення водню до кисню визначалося за об'ємним заповненням оболонки. Це забезпечило отримання в оболонці воднево-кисневої суміші атмосферного тиску, близькому до співвідношення водню до кисню 2:1 (стехіометричні суміш). Температура формованої суміші становила 300 ± 2 К. Процес ініціювання детонації також реєструвався на фотоапараті Casio EX-ZR10 ExilimDigitalCamera в режимі швидкісної відео зйомки з частотою кадрів – 480 кадр/с.

На основі пульсуючих детонаційних систем, запропонований варіант реалізації детонаційного лазера. За рахунок детонаційного згоряння палива, використання для накачування енергії хімічних реакцій та через відсутність додаткової системи прокачування робочого середовища зменшуються

масогабаритні показники системи, збільшується коефіцієнт корисної дії та підвищення робочої температури в середовищі. Експериментально підтверджено, що за рахунок зниження напруги заряду ємності (напруженості електричного поля E) в розряді з предіонізацією досягається збільшення опору розрядного каналу і зростанням частки енергії розряду, що виділяється на газорозрядному проміжку і приелектродних областях. Наприклад, в умовах проведених експериментів при зниженні $E=351$ В/см до $E=219$ В/см дана частка зросла на 5 %. На підставі цього до джерела ініціювання детонації в пульсуючих детонаційних системах формуються вимоги щодо застосування імпульсних джерел енергії з напругою заряду до 200 В [19].

Детонаційний лазер працює таким чином [20]. Детонаційна труба 1, що має відкритий отвір з одного боку, через систему клапанів 2 заповнюється воднево-кисневою сумішшю 3, здатною до детонації. Біля закритого торця труби за допомогою джерела розряду 4 здійснюється ініціювання детонації 5 у суміші 3. Поширення детонації 6 по суміші 3 призводить до “миттєвого” її згоряння рис. 9.

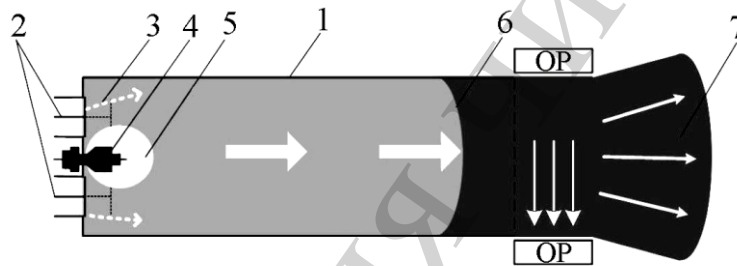


Рис. 9. Схема роботи детонаційного лазера: ОР – оптичний резонатор

Результатом детонаційного згоряння є зростання тиску та температури в продуктах хімічної реакції, серед яких наявні молекули диоксиду вуглецю CO_2 . Перепад тиску, що утворюється між продуктами детонації та зовнішнім середовищем, призводить до надзвукового розширення продуктів детонації із швидким охолодженням у зоні оптичного резонатора 7. Це створює умови для виникнення інверсії насиченості в коливально збуджених молекулах CO_2 та забезпечує виникнення лазерного випромінювання.

За великої частоти ініціювання детонації стає прийнятним обмеження витрат енергії розряду на ініціювання детонації. Так за витрати енергії на один імпульс ініціювання близько 500 Дж сумарна потужність системи ініціювання детонації за частоти 100 Гц становить 50 кВт. Це робить детонаційні лазери енерговитратними з виникненням технічних проблем щодо енергозабезпечення. Визначено, що енергія імпульсу ініціювання не повинна перевищувати 50 Дж.

Створення та застосування детонаційного лазера з параметрами дозволяє проводити дезактивацію радіоактивно забруднених об'єктів. Часткове охолодження системи відбувається за рахунок періодичного режиму роботи з заповнюванням труби холодною сумішшю, виключається потреба у використанні великих систем охолодження. В результаті проведеними

дослідженнями і отриманими результатами створено систему ініціювання, що працює на воднево-кисневій суміші, з такими параметрами:

- енергія на поодинокі ініціювання детонації – 50 Дж;
- частота ініціювання детонації – 50 Гц;
- споживана потужність – 4 кВт;
- довжина хвилі випромінювання – 10,6 мкм.

Температура в продуктах детонації може перевищувати 3000 К, що відрізняється від газодинамічних CO₂-лазерів, де робоча температура не перевищує 1400 К, або хімічних лазерів, де температура сягає 1500–1800 К. У разі підвищення температури зростає потужність [21].

5. Обговорення результатів дослідження ініціювання детонації

Встановлені джерела поглинання енергії іскрового розряду в процесі прямого ініціювання детонації в газових сумішах і визначені механізми впливу на розрядний процес. Напруга імпульсного джерела енергії зменшується до напруги менше 2000 В, а використовуючи IGBT-ключі, виникає можливість припинення розряду після $\frac{1}{4}$ періоду розряду.

Удосконалена розрахункова модель визначення миттєвих значень енергії, заснована на розрахунку перехідного процесу в *RLC*-колі з послідовно увімкненим іскровим проміжком. У цьому випадку струмопровідний канал розширюється та враховується зміна падіння напруги на газорозрядному проміжку. Удосконалена математична модель прямого ініціювання детонації іскровим розрядом, яка урахує введення енергії в розрядний канал, що змінюється в часі та просторі, урахуванні втрати енергії розряду на процеси дисоціації та іонізації.

Запропонована схема роботи лазера на основі періодичного детонаційного згоряння палива. Головною та невирішеною на сьогоднішній день проблемою в практичній реалізації пульсуючих детонаційних систем є створення енергоефективної системи періодичного ініціювання детонації. Тому створення технології, що забезпечує збільшення коефіцієнта перетворення енергії іскрового розряду в ударну хвилю, належить до технологій подвійного призначення.

Перевагами отриманих результатів є зниження повних затрат енергії іскрового розряду на ініціювання до 50 Дж, що втричі менше, ніж в існуючих системах.

Для реалізації вимог щодо підвищення енергоефективності системи ініціювання детонації в пульсуючих детонаційних системах потрібно забезпечити управління іскровим розрядом. Актуальним є завдання зниження споживаної потужності системи ініціювання детонації за рахунок зменшення втрат енергії розряду

6. Висновки

1. Експериментально встановлено, що в ємнісному розряді з попередньою іонізацією плазмовим струменем на частку енергії розряду, що виділяється на газорозрядному проміжку, впливає напрямок виходу струменя. В умовах

проведених експериментальних досліджень в разі виходу плазмового струменя з катода в напрямку анода дана частка на 5...10 % перевищувала за інших рівних умовах частку енергії, що виділяється під час виходу струменя з анода. На підставі цього до джерела ініціювання детонації в пульсуючих детонаційних системах висуваються вимоги щодо формування плазмового струменя з катода.

2. Зниження витрат енергії розряду на пряме ініціювання детонації в пульсуючих детонаційних системах може бути досягнуто за рахунок “примусового” зниження напруженості електричного поля в газорозрядному каналі, що призведе до обмеження температури газоплазми з відповідним зменшенням витрат енергії на процеси дисоціації та іонізації. У разі обмеження температури до 4000...5000 К реалізуються умови для переважання екзотермічної реакції із відповідним додатковим підведенням енергії хімічній реакції.

3. На основі отриманих результатів сформовані вимоги до джерела ініціювання детонації при яких забезпечується зниження витрат енергії розряду, в разі від систем, що існують.

Література

1. Галак О. В. Застосування детонаційних CO₂-лазерів для дезактивації // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних сил. 2014. № 1. С. 241–245.
2. Laser decontamination of metallic surfaces / Veiko V. P., Shakhno E. A., Smirnov V. N., Myaskovskii A. M., Borovskikh S. S., Nikishin G. D. // Journal of Optical Technology. 2007. Vol. 74, Issue 8. P. 536. doi: <https://doi.org/10.1364/jot.74.000536>
3. Мобильный лазерный комплекс для аварийно восстановительных работ в газовой промышленности / Блохин О. А., Востриков В. Г., Красюков А. Г. и др. // Газовая промышленность. 2001. С. 33–34.
4. Stem R. C., Pdsner J. A. Atomic Vapor Laser Isotope Separation // First International Laser Science Conference. 1985. Issue 8.
5. Gas generating system for chemical lasers: Pat. No. US5624654 A. No. 5,624,654 USA. declared: 13.05.1996; published: 29.04.1997.
6. Efficiency of concrete removal with a pulsed Nd:YAG laser / Savina M., Xu Z., Wang Y., Reed C., Pellin M. // Journal of Laser Applications. 2000. Vol. 12, Issue 5. P. 200. doi: <https://doi.org/10.2351/1.1309551>
7. Cutting performance of a chemical oxygen-iodine laser / Latham W. P., Rothenflue J. A., Helms C. A., Kar A., Carroll D. L. // Gas and Chemical Lasers and Intense Beam Applications. 1998. doi: <https://doi.org/10.1117/12.308059>
8. Способ дезактивации поверхности, расположенной в зоне радиоактивного загрязнения ядерной установки: Пат. № 5011049/25 Франция. № 2084978; заявл. 24.03.1992; опубл. 20.07.1997, Бюл. № 16.
9. Miljanic S., Stjepanovic N., Trtica M. An attempt to use a pulsed CO₂ laser for decontamination of radioactive metal surfaces // Journal of the Serbian Chemical Society. 2000. Vol. 65, Issue 5-6. P. 445–450. doi: <https://doi.org/10.2298/jsc0006445m>

10. Laser decontamination of the radioactive lightning rods / Potiens A. J., Dellamano J. C., Vicente R., Raele M. P., Wetter N. U., Landulfo E. // *Radiation Physics and Chemistry*. 2014. Vol. 95. P. 188–190. doi: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2013.03.043>
11. Laser assisted removal of fixed radioactive contamination from metallic substrate / Kumar A., Prakash T., Prasad M., Shail S., Bhatt R. B., Behere P. G., Biswas D. J. // *Nuclear Engineering and Design*. 2017. Vol. 320. P. 183–186. doi: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2017.06.003>
12. Radioactive oxide removal by XeCl laser / Delaporte P., Gastaud M., Marine W., Sentis M., Uteza O., Thouvenot P. et. al. // *Applied Surface Science*. 2002. Vol. 197-198. P. 826–830. doi: [https://doi.org/10.1016/s0169-4332\(02\)00456-7](https://doi.org/10.1016/s0169-4332(02)00456-7)
13. Dry excimer laser cleaning applied to nuclear decontamination / Delaporte P., Gastaud M., Marine W., Sentis M., Uteza O., Thouvenot P. et. al. // *Applied Surface Science*. 2003. Vol. 208-209. P. 298–305. doi: [https://doi.org/10.1016/s0169-4332\(02\)01360-0](https://doi.org/10.1016/s0169-4332(02)01360-0)
14. Джиджоев М. С. Детонационный газодинамический лазер // *Письма в ЖЕТФ*. 1971. Т. 13. С. 73–76.
15. Баженова Т. В., Голуб В. В. Использование газовой детонации в управляемом частотном режиме (обзор) // *Физика горения и взрыва*. 2003. № 4. С. 3–21.
16. Кoryтченко К. В., Галак А. В. Усовершенствованный метод расчета динамики ввода энергии в искровой канал по кривой разрядного тока // *Прикладная радиоэлектроника*. 2011. Т. 10, № 1. С. 51–59.
17. Гельфанд Б. Е. Пределы детонации воздушных смесей двухкомпонентными газообразными горючими веществами // *Физика горения и взрыва*. 2002. Т. 38, № 5. С. 101–104.
18. Кoryтченко К. В., Болюх В. Ф., Галак А. В. Экспериментальное исследование эффективности ввода энергии в газовом разряде с предионизацией // *Прикладная радиоэлектроника*. 2011. Т. 10, № 3. С. 361–367.
19. Кoryтченко К. В., Болюх В. Ф., Галак А. В. Обоснование динамики ввода энергии в газоразрядный канал при моделировании инициирования детонации искровым разрядом // *Електротехніка і електромеханіка*. 2011. № 3. С. 70–73.
20. Напрями розвитку лазерної зброї вчора, сьогодні, завтра / Галак О. В., Карлов Д. В., Чернявський О. Ю., Сінько О. Г. // *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2013. № 4 (13). С. 123–130.
21. Галак О. В. Перспективи розвитку пульсуючих детонаційних двигунів. Труднощі їх реалізації // *Системи озброєння і військова техніка*. 2014. № 2. С. 73–76.